

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Energi merupakan suatu kekuatan yang dimiliki oleh suatu zat sehingga zat tersebut mempunyai pengaruh pada keadaan sekitarnya. Menurut mediumnya dikenal banyak jenis energi. Diantaranya, energi gelombang, energi arus laut, energi kosmos, energi yang terkandung pada senyawa atom, dan energi-energi lain yang bila dimanfaatkan akan berguna bagi kebutuhan manusia. Salah satu dari energi tersebut adalah energi angin yang jumlahnya tak terbatas dan banyak digunakan untuk meringankan kerja manusia. Angin memberikan energi gerak sehingga mampu menggerakkan perahu layar, kincir angin, dan bisa dimanfaatkan menjadi pembangkit listrik yaitu berupa turbin angin. Keberadaan energi angin ini terdapat di lapisan atmosfer bumi yang banyak mengandung partikel udara dan gas. Lapisan troposfer merupakan lapisan atmosfer terendah bumi dan di lapisan ini semua peristiwa cuaca termasuk angin terjadi.

Energi angin adalah energi yang terkandung pada massa udara yang bergerak. Energi angin berasal dari energi matahari. Pemanasan bumi oleh sinar matahari menyebabkan perbedaan massa jenis (ρ) udara. Perbedaan massa jenis ini menyebabkan perbedaan tekanan pada udara sehingga akan terjadi aliran fluida dan menghasilkan angin. Kondisi aliran angin dipengaruhi oleh permukaan bumi yang dilalui aliran angin dan perbedaan temperatur permukaan bumi.

2.1.1 kandungan energy dalam angin

Bentuk energi yang terdapat pada angin yang dapat diekstraksi oleh turbin angin adalah energi kinetiknya. Angin adalah massa udara yang bergerak. Besarnya energi yang terkandung pada angin tergantung pada kecepatan angin dan massa jenis angin atau udara yang bergerak tersebut. Jika diformulasikan, besar energi kinetik yang terkandung pada angin atau udara bergerak yang bermassa m dan berkecepatan v adalah:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

E_k = Energi kinetik (joule)

m = massa udara (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

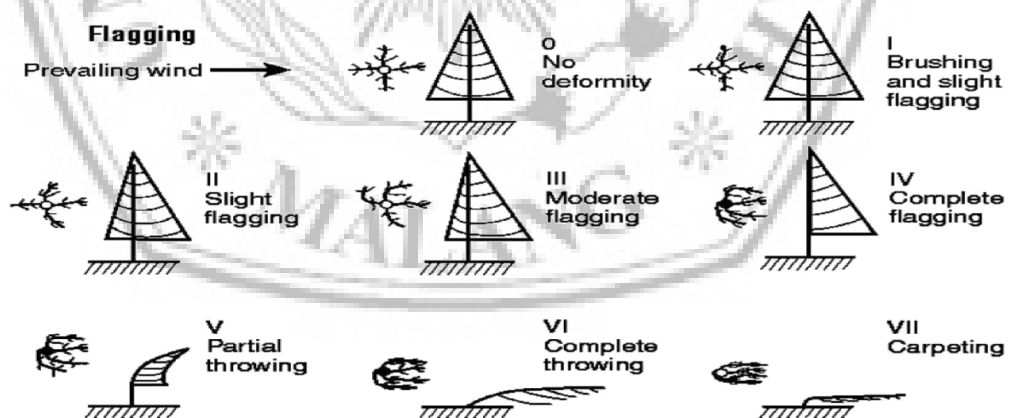
Energi kinetik yang terdapat pada angin berbanding lurus dengan massa jenis udara (ρ) dan berbanding lurus dengan kuadrat dari kecepatannya.

2.1.2 Pengukuran Angin

Parameter yang diukur pada proses konversi energi angin pada umumnya adalah kecepatan dan arahnya. Kecepatan angin diukur dengan menggunakan alat anemometer. Anemometer mempunyai banyak jenis dan salah satunya adalah anemometer tangan.

Anemometer tangan terdiri dari semacam kipas kecil pada ujungnya yang akan berputar ketika dilalui oleh angin. Jumlah putaran setiap waktu direkam dan dinyatakan dalam besaran kecepatan angin. Pembacaan skala kecepatan angin dapat dilakukan dengan melihat skala pembaca yang terdapat pada anemometer.

Griggs-Putnam membuat indeks kecepatan angin berdasarkan deformasi yang terjadi pada pohon seperti tampak pada gambar berikut:



Indeks	satuan	I	II	III	IV	V	VI	VII
Kecepatan angin	mph	7 – 9	9 – 11	11 – 13	13 – 15	15 – 18	16 – 21	21+
	m/s	3 – 4	4 – 5	5 – 6	6 – 7	7 – 8	8 – 9	10+

Gambar 2.1 Indeks beserta deformasi yang terjadi pada pohon (Sumber: Wind Turbine Techonology)

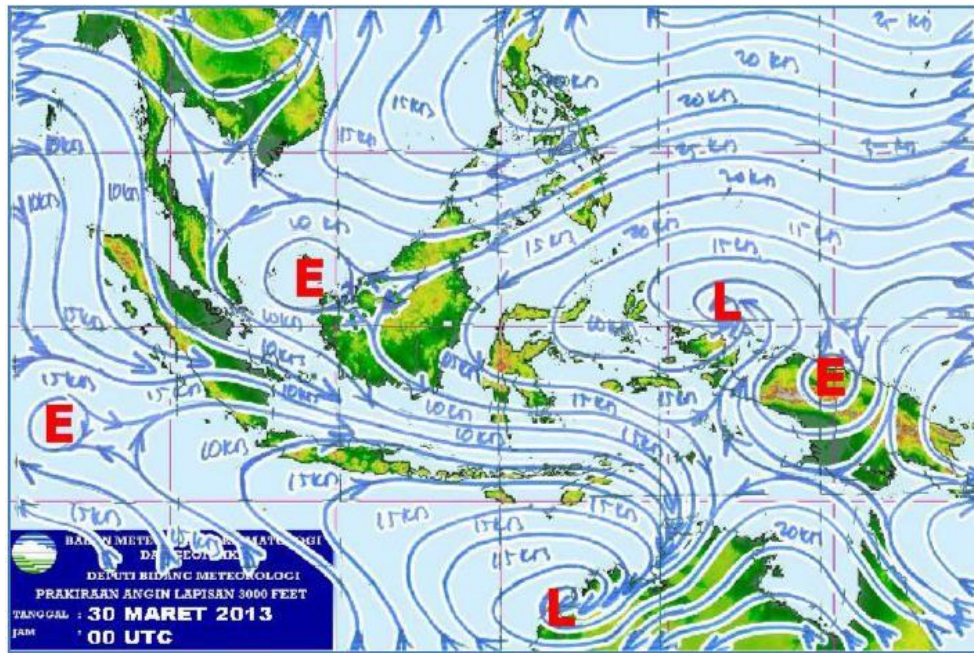
2.2 Potensi Angin Di Indonesia

Berdasarkan data kecepatan angin di berbagai wilayah, sumberdaya energi angin Indonesia berkisar antara 2,5 – 5,5 m/detik pada ketinggian 24 meter di atas permukaan tanah. Dengan kecepatan tersebut sumberdaya energi angin Indonesia termasuk dalam kategori kecepatan angin kelas rendah hingga menengah. Secara keseluruhan, potensi energi angin Indonesia diperkirakan mencapai 9.290 MW. Angin di wilayah Indonesia secara umum di sebelah utara khatulistiwa bertiup dari arah Barat Laut menuju Timur Laut. Sedangkan di sebelah selatan khatulistiwa bertiup dari arah Barat Daya menuju Barat Laut. Kecuali di Sumatera bagian selatan dan Jawa angin bertiup dari arah Timur menuju Tenggara.

Dikutip dari majalahenergi.com diperoleh data kecepatan angin rata-rata tahunan pada beberapa daerah di kawasan Indonesia. Pengukuran kecepatan angin ini dilakukan pada ketinggian 50 m yang dapat dilihat pada Lampiran. Dari data kecepatan angin ini memungkinkan untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga angin berskala kecil di Indonesia. Berikut ini merupakan data potensi energi terbarukan di Indonesia.

Tabel.2.1 Potensi energi terbarukan di Indonesia

Jenis energi	Sumber daya	Setara	Kapasitas terpasang
Air	845 x 10 ⁶ BOE	75,7 GW	4200 MW
Panas bumi	219 x 10 ⁶ BOE	27,0 GW	800 MW
Mini/Mikrohidro	458 MW	458 MW	84 MW
Biomassa	49,81 GW	49,8 GW	302,4 MW
Surya	4,8 kWh/m ² /hari	---	8,0 MW
Angin	9,29 GW	9,3 GW	0,5 MW



Gambar.2.2 Aliran angin di Indonesia (Sumber: bmkgo.id)

2.3 Turbin Angin

Turbin angin merupakan salah satu alat yang mekanisme kerjanya memanfaatkan energi angin. Di negara-negara maju, sudah banyak pemanfaatan turbin angin sebagai pembangkit listrik. Turbin angin yang digunakan dapat menghasilkan kapasitas listrik yang tinggi yaitu mencapai ratusan megawatt. Di negara-negara berkembang, penggunaan turbin angin berada dalam skala riset. Hal ini dikarenakan teknologi yang berada di negara tersebut masih butuh pengembangan lebih lanjut untuk memperoleh turbin angin yang bagus. Oleh karena itu, untuk riset turbin angin akan dicari sebuah desain dan bahan beserta analisisnya untuk membuat turbin angin lebih baik dari sebelumnya.

2.3.1 Defenisi dan Pengelompokan Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah alat yang memanfaatkan energi kinetik angin dan mengubahnya kedalam bentuk energi gerak putaran rotor dan poros generator untuk menghasilkan energi listrik. Energi gerak yang berasal dari angin akan diteruskan menjadi gaya gerak dan torsi pada poros generator yang kemudian akan dihasilkan energi listrik. Turbin angin adalah mesin penggerak yang memanfaatkan angin sebagai penggerakannya.

Berdasarkan arah sumbu geraknya, turbin angin terbagi menjadi 2, yaitu: turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu horizontal memiliki sumbu putar yang sejajar dengan tanah. Turbin angin sumbu vertikal memiliki sumbu putar yang arahnya tegak lurus dengan tanah.

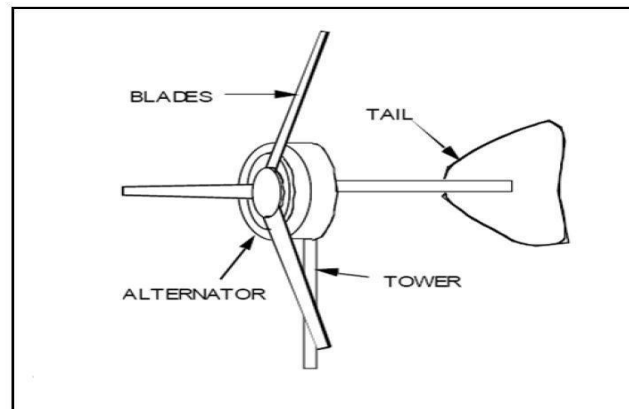
Berdasarkan prinsip gaya aerodinamik yang terjadi pada rotor, turbin angin terbagi 2 yaitu drag dan lift. Pengelompokan berdasarkan prinsip aerodinamik pada rotor adalah apakah turbin angin menangkap energi angin dengan hanya memanfaatkan gaya drag dari aliran udara yang melalui rotor atau memanfaatkan gaya lift yang dihasilkan dari aliran udara yang melalui bentuk aerodinamis sudu. Dua kelompok ini memiliki perbedaan yang jelas pada kecepatan putar rotornya. Rotor turbin angin jenis drag berputar dengan kecepatan putar rendah sehingga disebut juga turbin angin putaran rendah. Rotor turbin angin jenis lift pada umumnya berputar pada kecepatan putar tinggi bila dibandingkan dengan jenis drag sehingga disebut juga sebagai turbin angin putaran tinggi. Setiap jenis turbin angin memiliki perancangan, kekurangan dan kelebihan masing-masing.

2.3.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal mempunyai sumbu putar yang terletak sejajar dengan permukaan tanah dan sumbu putar rotor yang searah dengan arah angin. Komponen utama turbin angin sumbu horizontal meliputi: Sudu (*blade*), ekor (*tail*), tiang penyangga (*tower*), dan alternator. Berdasarkan letak rotor terhadap arah angin, turbin angin sumbu horizontal dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. *Upwind*
2. *Downwind*

Turbin angin jenis *upwind* memiliki rotor yang menghadap arah datangnya angin sedangkan turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang membelakangi arah datang angin.



Gambar 2.3 Komponen utama turbin angin sumbu horizontal (Sumber: Wind Blade Rotor Construction, Hugh Piggot)

2.3.3 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin angin yang pertama dibuat manusia. Pada awalnya, putaran rotornya hanya memanfaatkan efek *magnus* yaitu karena adanya selisih gaya drag pada kedua sisi rotor atau sudu sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Salah satu contoh turbin angin sumbu vertikal jenis drag adalah turbin angin savonius, yang mana terdiri dari dua atau tiga lembar pelat yang dilengkungkan pada arah tangensial yang sama terhadap sumbu putar. Turbin angin poros vertikal atau yang lebih dikenal memiliki ciri utama yaitu keberadaan poros tegak lurus terhadap arah aliran angin atau tegak lurus terhadap permukaan tanah.

Keuntungan dari konsep turbin angin sumbu vertikal adalah lebih sederhana perancangan dan pembuatannya dibandingkan turbin angin sumbu horizontal. Keuntungan-keuntungan tersebut diantaranya adalah memungkinkan penempatan komponen mekanik, komponen elektronik, transmisi roda gigi, dan generator dekat dengan permukaan tanah. Rotor turbin angin sumbu vertikal berputar tanpa dipengaruhi arah datangnya angin sehingga tidak membutuhkan mekanisme pengatur arah (seperti ekor) seperti pada turbin angin sumbu horizontal. Beberapa jenis turbin angin sumbu vertikal adalah sebagai berikut:

a. Savonius Rotor

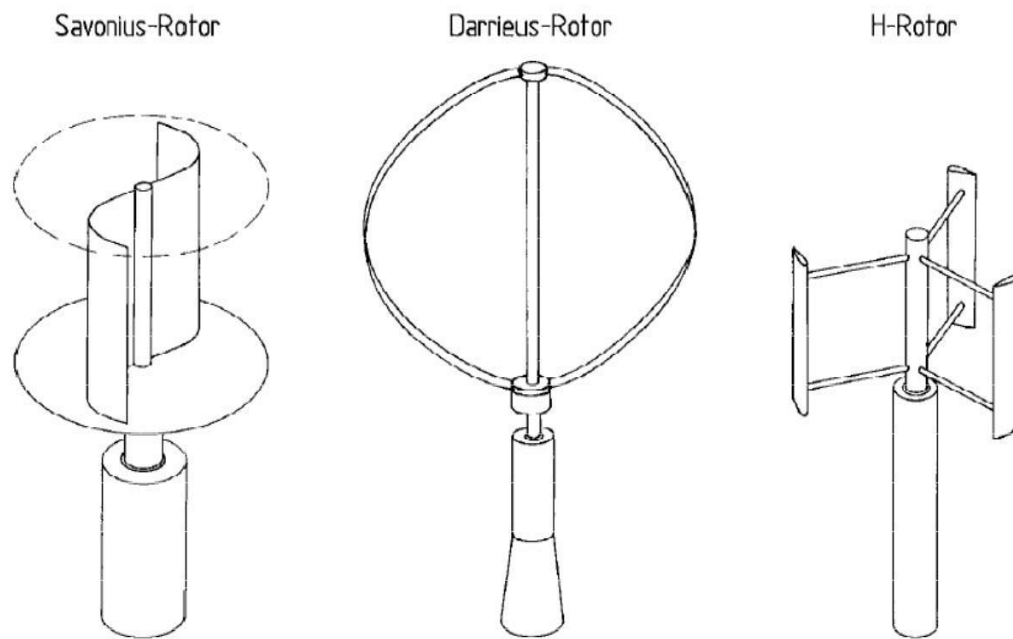
Turbin angin dengan konstruksi sederhana yang ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius (1922). Turbin yang termasuk dalam kategori TASV (Turbin Angin Sumbu Vertikal) ini memiliki rotor dengan bentuk dasar setengah silinder. Konsep turbin angin savonius cukup sederhana, prinsip kerjanya berdasarkan *differential drag windmill*. Pada perkembangan selanjutnya, savonius rotor tidak lagi berbentuk setengah silinder tetapi telah mengalami modifikasi guna peningkatan *performance* dan efisiensi.

b. Darrieus Rotor

Merupakan salah satu TASV (Turbin Angin Sumbu Vertikal) dengan efisiensi terbaik serta mampu menghasilkan torsi cukup besar pada putaran dan kecepatan angin yang tinggi. Turbin angin Darrieus mengaplikasikan blade dengan bentuk dasar aerofoil NACA. Prinsip kerja turbin angin Darrieus yaitu memanfaatkan gaya lift. Kelemahan utama dari turbin angin Darrieus yaitu yakni memiliki torsi awal berputar yang sangat kecil hingga tidak dapat melakukan self start. Pada aplikasinya, darrieus wind turbine selalu membutuhkan perangkat bantuan untuk melakukan putaran awal. Perangkat bantu yang digunakan berupa motor listrik atau umumnya lebih sering menggunakan gabungan turbin angin Savonius pada poros utama. Untuk menghindari fluktuasi torsi yang besar, aplikasi turbin angin Darrieus umumnya menggunakan tiga blade.

c. H-Rotor

Turbin tipe H adalah variasi dari tipe Darrieus. Keduanya sama-sama menggunakan prinsip gaya angkat untuk menggerakkan sudu. Tipe H jauh lebih simple dari tipe Darrieus. Bila tipe Darrieus menggunakan bilah lurus. Bilah ini dihubungkan ke poros menggunakan batang atau lengan, kemudian poros langsung dihubungkan fengan generator.



Gambar 2.4 Jenis-Jenis Turbin Angin Sumbu Vertikal (Sumber: Wind Turbines, Eric Hau)

Perbandingan antara turbin angin tipe Savonius, Darrieus dan Tipe H dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan Karakteristik Turbin Angin Savonius, Darrieus dan Tipe H

savonius	darrieus	Tipe H
<ul style="list-style-type: none"> Dapat berputar pada kecepatan angin rendah 	<ul style="list-style-type: none"> Koefisien daya tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> Desain sederhana
<ul style="list-style-type: none"> Proses manufaktur mudah 	<ul style="list-style-type: none"> Telah dibuat dalam skala besar 	<ul style="list-style-type: none"> Koefisien daya kurang lebih sama dengan tipe darrieus
<ul style="list-style-type: none"> Koefisien daya rendah 	<ul style="list-style-type: none"> Tidak dapat memulai putar sendiri (<i>self start</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> Proses manufaktur mudah
	<ul style="list-style-type: none"> Tidak dapat diatur kecepatan putarnya lewat sudut serang 	<ul style="list-style-type: none"> Dapat dilakukan <i>pitching</i> pada bilah sudu
	<ul style="list-style-type: none"> Proses manufaktur susah dan butuh biaya besar 	

Sumber: <http://newideaofwindturbine.wordpress.com/tag/turbin-angin-vertikal/>

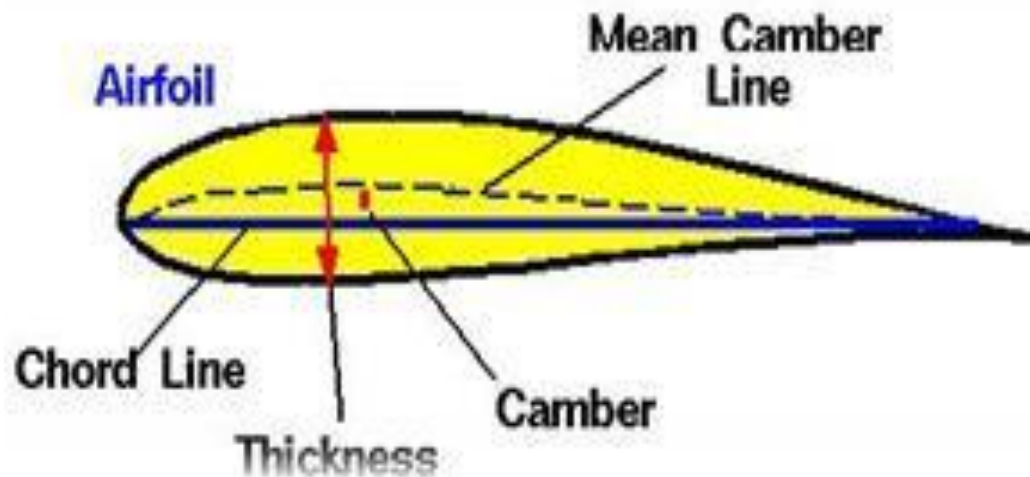
2.4 Airfoil

Airfoil NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) adalah salah satu bentuk bodi aerodinamika sederhana yang berguna untuk dapat memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu bodi lainnya dan dengan bantuan penyelesaian matematis sangat memungkinkan untuk memprediksi berapa besarnya gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu bodi *airfoil*. Geometri *airfoil* memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik aerodinamika dengan parameter penting berupa CL, dan kemudian akan terkait dengan lift (gaya angkat yang dihasilkan) (Mulyadi, 2010).

Hingga sekitar Perang Dunia II, *airfoil* yang banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama periode ini banyak pengajuan *airfoil* dilakukan diberbagai negara, namun hasil riset NACA lah yang paling terkemuka. Pengujian yang dilakukan NACA lebih sistematis dengan membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan atau *thickness* serta pengujiannya dilakukan pada bilangan Reynold yang lebih tinggi dibanding yang lain. Hal ini sering dirangkum oleh beberapa parameter seperti: ketebalan maksimum, maksimum bentuk melengkung, posisi max ketebalan, posisi maks bentuk melengkung, dan hidung jari-jari. Seperti terlihat pada gambar 2.5 suatu *airfoil* terdiri dari:

Permukaan atas (*Upper Surface*)

- Permukaan bawah (*Lowerer Surface*)
- *Mean camber line* adalah tempat kedudukan titik-titik antara permukaan atas dan bawah *airfoil* yang diukur tegak lurus terhadap *mean camber line* itu sendiri.
- *Leading edge* adalah titik paling depan pada *mean camber line*, biasanya berbentuk lingkaran dengan jari-jari mendekati 0,02 c.
- *Trailing edge* adalah titik paling belakang pada *mean camber line*
- *Camber* adalah jarak maksimum antara *mean camber line* dan garis *chord* yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.
- Ketebalan (*thickness*) adalah jarak antara permukaan atas dan permukaan bawah yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.



Gambar 2.5 NACA airfoil geometry

Sumber: <http://michaelsuseno.blogspot.com/2011/09/airfoil>

2.5 Gaya Aerodinamik pada Turbin Angin

Sudu atau rotor berfungsi untuk menghasilkan putaran akibat gaya angin dan menggerakkan poros turbin dan poros generator yang kemudian akan menghasilkan energi listrik.

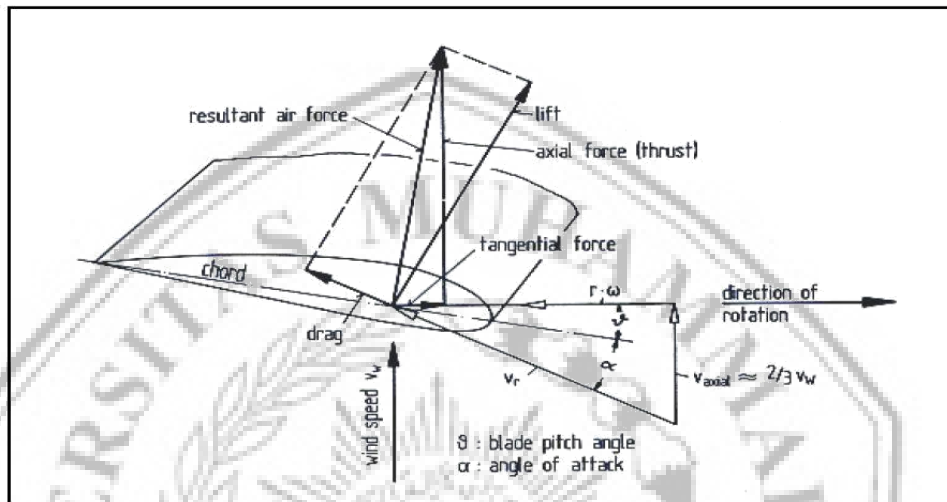
Sudu turbin angin diusahakan memiliki kekasaran yang sama pada setiap permukaannya sehingga gaya lift yang dihasilkan tinggi. Bagian pangkal sudu dicengkeram oleh *hub* dengan menggunakan baut. Jari-jari sudu adalah jarak dari sudu dari permukaan poros rotor sampai ujung dari sudu.

Pada sudu turbin angin akan terjadi tegangan geser pada permukaannya ketika kontak dengan udara. Distribusi tegangan geser pada permukaan sudu ini dipresentasi dengan adanya gaya tekan (*drag*) yang arahnya sejajar dengan arah aliran fluida dan gaya angkat (*lift*) yang arahnya tegak lurus dari arah aliran fluida. Kedua gaya ini menyebabkan sudu dapat berputar. Kedua gaya ini dipengaruhi oleh bentuk sudu, luas permukaan bidang sentuh, sudut serang, dan kecepatan angin. Secara matematis, kedua gaya ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_D = \int d F_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \dots \dots \dots (2.2)$$

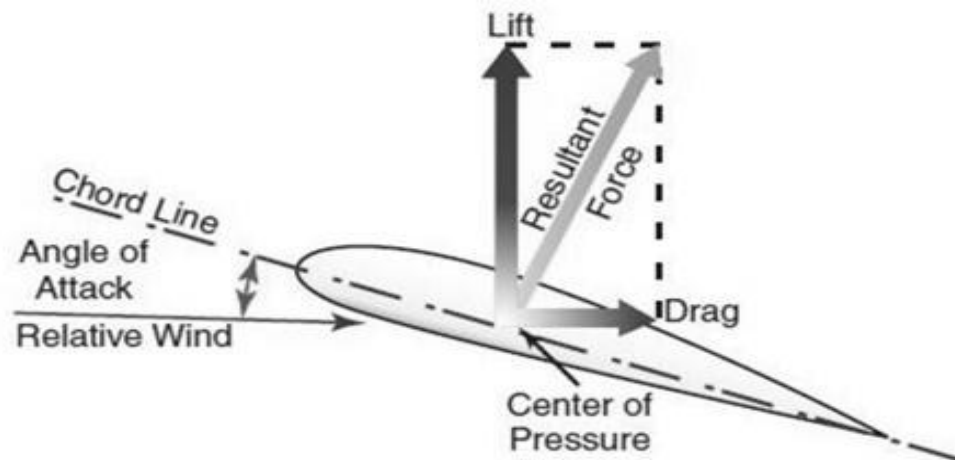
$$F_L = \int dF_y = \int p \sin \theta dA + \int \tau_w \cos \theta dA \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana P adalah tekanan yang terjadi pada permukaan sudu akibat gaya aliran udara, sedangkan θ adalah sudut yang dibentuk antara arah aliran udara terhadap sumbu normal sudu



Gambar 2.6 Penampang sudu (Sumber: Wind Turbines, Erich Hau)

Istilah *drag* merupakan gaya yang berasal dari energi angin yang mendorong lurus sudu searah dengan arah angin. Gaya drag pada dasarnya digunakan oleh turbin angin savonius. Gaya ini menyebabkan sudu bergerak. Namun, gerakan rotor yang terjadi sangat rendah dan sudu yang sebenarnya bergerak melawan arah angin akan memperlambat gerak rotor. Selain itu, terdapat gaya lain berupa *lift* yang selalu bekerja pada sudut airfoil yang mengarahkan sudu terangkat akibat gerak angin. Sudu turbin angin sumbu horizontal mengalami gaya *lift* dan gaya *drag*, namun gaya *lift* jauh lebih besar dari gaya *drag* sehingga rotor turbin ini lebih dikenal dengan rotor turbin tipe *lift*.



Gambar 2.7 Fenomena drag dan lift

(Sumber: <http://michaelsuseno.blogspot.com/2011/09/airfoil>)

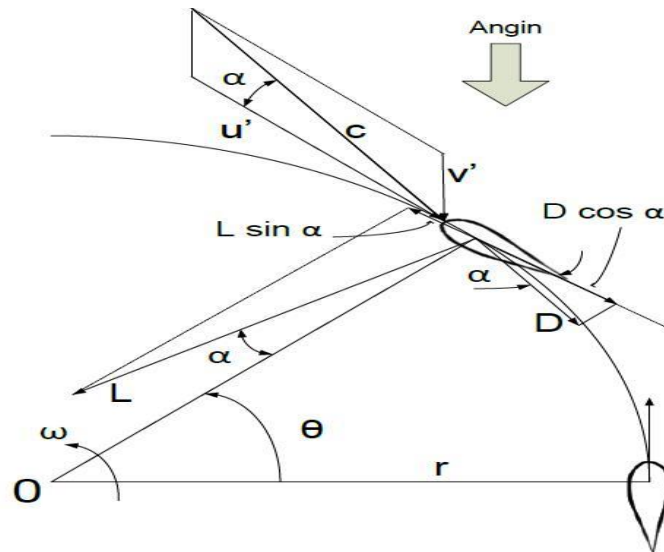
Untuk mempermudah perhitungan fenomena *drag* dan *lift*, maka dengan metode numeric (Gerhart), diperkenalkanlah *drag and lift coefficient* (koefisien gaya hambat dan gaya angkat) yang dilambangkan dengan C_D dan C_L . Besarnya C_L dan C_D bergantung dari bentuk melintang sudu yang digunakan dan sudut serang (α). Secara matematis, hubungan gaya drag dan lift dengan koefisiennya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \dots\dots\dots (2.4)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 A \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana ρ adalah massa jenis udara, A adalah luas penampang sudu, dan U adalah kecepatan angin.

Hubungan antara C_L dan C_D terhadap sudut serang (α) diukur dan ditentukan secara eksperimen dan sudah dibukukan dalam suatu catalog.



Gambar 2.8 Skematik gaya drag dan lift pada sudu turbin angin

Keterangan gambar:

L = gaya *lift* sudu (N)

D = gaya *drag* sudu (N)

ω = kecepatan sudut elemen sudu (rad/s)

r = radius turbin (m)

α = sudut serang sudu ($^{\circ}$)

c = kecepatan absolut elemen sudu (resultan vektor v' dengan u')

$$C = v' \{ (\lambda + \cos\theta)^2 + (\sin\theta)^2 \}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.6)$$

v' = kecepatan angin (m/s)

u' = kecepatan tangensial elemen sudu (m/s)

$$u' = r\omega \dots \dots \dots (2.7)$$

Catatan: - gaya *lift* L tegak lurus terhadap komponen kecepatan c

- gaya *drag* D paralel terhadap komponen kecepatan c

2.6 Power Coefficient dan Tip Speed Ratio

Desain aerodinamik pada turbin angin memerlukan banyak pengetahuan fisika dasar tentang hukum konversi energi. Seorang perancang akan menghadapi permasalahan tentang hubungan antara bentuk sudu, jumlah sudu, dan sifat-sifat aerodinamik.

Bet'z memudahkan teori momentum pada sudu turbin dengan cara pemodelan aliran dua dimensi. Aliran udara ini akan menyebabkan defleksi pada *airfoil*. Gerakan dari angin ini akan menggerakkan sudu sehingga timbul gerak putar pada sudu turbin.

Power Coefficient (C_p) adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu akibat gaya angin terhadap daya yang dihasilkan oleh gaya lift pada aliran udara. Secara matematis, hubungan ini dapat dituliskan:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[\left[1 - \left[\frac{v_2}{v_1} \right]^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \right] \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana:

C_p = koefisien daya

P = daya mekanik yang dihasilkan rotor (watt)

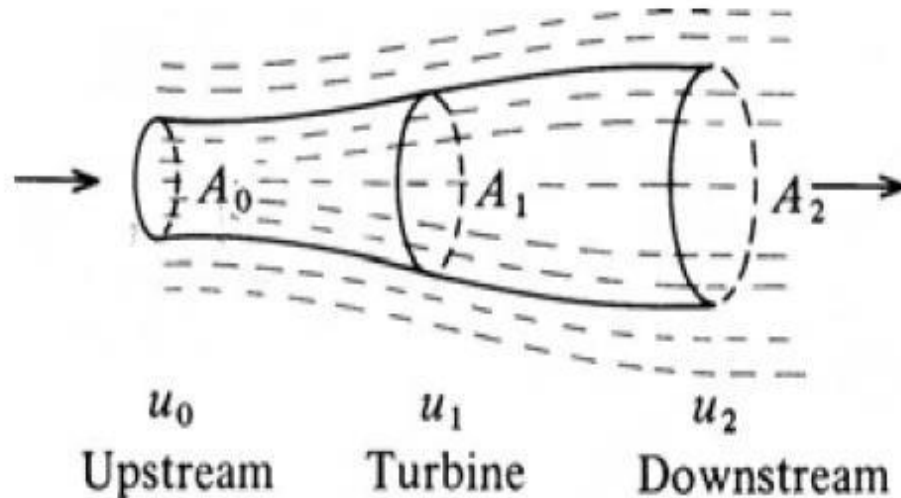
P_0 = daya mekanik total yang terkandung dalam angin yang melalui sudu (watt)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

A = luas penampang bidang putar sudu (m^2)

v_1 = kecepatan aliran udara sebelum melewati sudu rotor (m/s)

v_2 = kecepatan aliran udara setelah melewati sudu rotor (m/s)



Gambar 2.9 Pemodelan Betz' untuk aliran angin

Energi yang terkandung pada *spin* (putaran sudu) akan mengurangi proporsi penggunaan energi total yang terkandung pada aliran. Secara teori momentum, *power coefficient* dari turbin harus lebih kecil daripada harga yang ditentukan oleh Betz's (sekitar 0,593). Hal ini disebabkan terjadinya *losses* pada mekanisme gerak turbin angin. *Power coefficient* bergantung pada rasio antara komponen energi gerak putar sudu dan gerak rotasi pada aliran udara. Rasio ini didefinisikan sebagai kecepatan tangensial sudu rotor terhadap kecepatan angin dan didefinisikan sebagai *tip speed ratio* (λ), yang secara umum direkomendasikan pada kecepatan tangensial dari ujung sudu.

$$\text{Tip speed ratio, } \lambda = \frac{u}{v\omega} \dots \dots \dots (2.10)$$

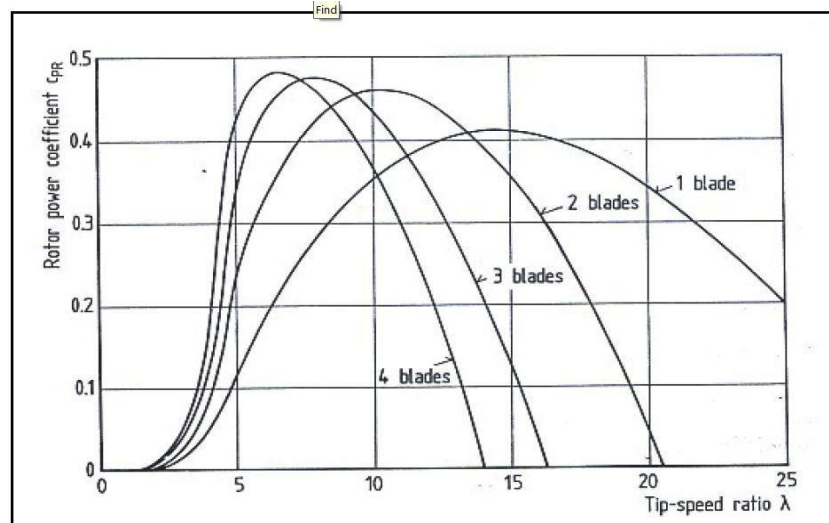
Dimana:

u = kecepatan tangensial dari ujung sudu (m/s)

v_w = kecepatan angin (m/s) atau *tip speed ratio*

$$\text{Tip speed ratio, } \lambda = \frac{\pi d n}{60 v} \dots \dots \dots (2.11)$$

dimana d adalah diameter sudu, n adalah putaran rotor atau sudu, dan v adalah kecepatan angin



Gambar 2.10 Kurva hubungan *Tip speed ratio* (λ) terhadap koefisien rotor (C_{PR}) pada berbagai jumlah sudu (Sumber: Wind Turbines, Erich Hau)

Kecepatan aksial V_a pada rotor turbin angin dengan kecepatan tangensial u pada radius dari penampang sudu dikombinasikan menjadi kecepatan aliran total V_r . Elemen dasar pada kurva daya rotor adalah *power coefficient* (C_P) yang merupakan fungsi dari tip speed ratio untuk semua spesifikasi turbin atau mesin angin. Pada beberapa sumber buku *power coefficient* didefinisikan sebagai *rotor power coefficient* (C_{PR}), sehingga besarnya nilai C_P dan C_{PR} adalah sama. Pada penampang sudu terdapat sudut serang (*angle of attack*) dan sudut pitch sudu. Sudut serang adalah parameter aerodinamik dan sudut pitch sudu adalah untuk parameter desain.

Perhitungan keseimbangan gaya meliputi tidak hanya pada drag dan lift *airfoil* murni, tetapi juga meliputi semua komponen drag dan lift lain yang terdapat di sekitar sudu. Resultan Drag merupakan fungsi dari koefisien lift lokal dan aspek rasio dari sudu. Perhitungan drag dan lift aerodinamik lokal, menurut teori momentum pada sudu (teori Betz's), terkait distribusi gaya aerodinamik sepanjang sudu. Terdapat dua komponen, yaitu: satu pada bidang putaran rotor yang dinamakan dengan distribusi gaya tangensial, dan satu lagi adalah distribusi gaya dorong.

Pada dasarnya besar tekanan yang terjadi antara pangkal (*top*) dengan ujung (*tip*) sudu adalah berbeda. Dengan mengetahui sudut pitch sudu, dapat ditentukan

besarnya lebar sudu. Besarnya lebar sudu merupakan fungsi dari sudut pitch dan *tip speed ratio*. Pada prosesnya, setiap sudu memiliki lapisan angin tertentu. Untuk jari-jari r yang kecil, jumlah angin yang melapisi sudu tentu akan lebih kecil. Secara matematis, besarnya sudu (chord) dapat dinyatakan dengan:

$$C = \frac{16\pi R(\frac{R}{r})}{9\lambda^2 B} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana C adalah ketebalan sudu, r adalah jari-jari sudu, R adalah jari-jari total turbin angin, dan B adalah jumlah sudu.

2.7 Karakteristik Daya Rotor

Teori momentum sederhana (teori Betz's) telah menyediakan persamaan dasar untuk menghitung besarnya output daya mekanik dari rotor (*mechanical power output*). Dengan menggunakan *power coefficient* C_P , daya rotor dapat dihitung sebagai fungsi dari kecepatan angin.

$$P_R = C_P \frac{\rho}{2} v_w^3 A \dots\dots\dots (2.13)$$

Atau,

$$P_R = C_P \eta \frac{\rho}{2} v_w^3 A \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

A = luas sudu

v_w = kecepatan angina

C_P = koefisien daya rotor

η = Efisiensi elektrik dan mekanik

P_R = daya rotor

ρ = massa jenis udara

2.8 Generator

Untuk menghasilkan energi listrik dari putaran turbin, perangkat turbin angin harus menggunakan generator. Generator adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja generator adalah menjadikan medan magnet yang ada disekitar konduktor mengalami fluktuasi atau perubahan,

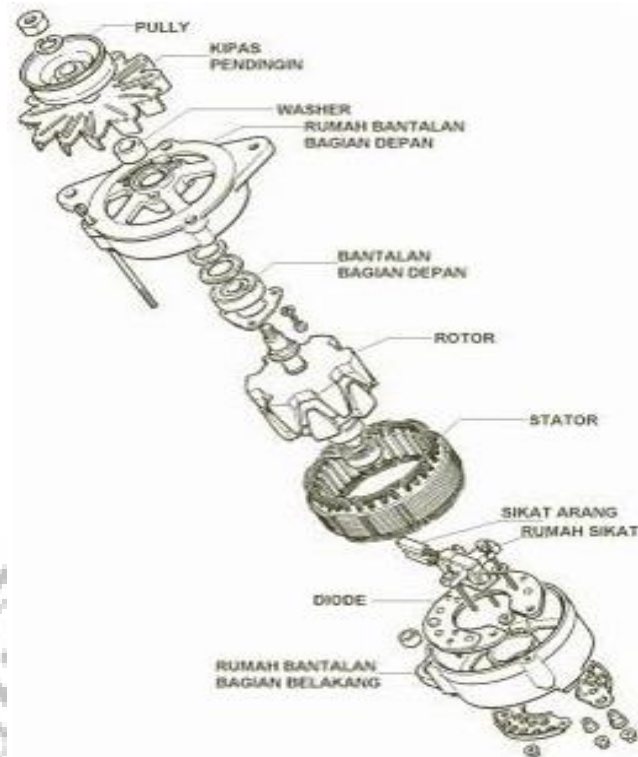
sehingga timbul tegangan listrik. Magnet yang berputar disebut rotor dan konduktor yang diam disebut stator.

Dari segi sifat kemagnetan, generator dibagi menjadi 2 jenis, yaitu generator magnet tetap dan generator magnet sementara. Pada generator dengan magnet tetap, sifat kemagnetannya tidak berubah dan tidak mudah hilang. Untuk membangkitkan listrik dengan generator ini, dilakukan dengan memutar poros generator supaya menyebabkan fluktuasi magnet dan dihasilkan tegangan listrik. Untuk generator magnet sementara sifat kemagnetannya mudah hilang. Sifat medan magnet yang terjadi pada generator ini dihasilkan dengan induksi. Untuk membangkitkan daya listrik, generator harus diberi arus listrik ketika kumparan magnetnya berputar.

Dari segi arus listrik yang dihasilkan, generator dibagi 2, yaitu generator arus bolak balik (AC) dan generator arus searah (DC). Generator arus bolak balik (AC) menghasilkan tegangan yang arahnya bolak balik dan bila dihubungkan dengan beban akan menimbulkan arus bolak balik pula. Generator AC dapat menghasilkan daya pada putaran yang bervariasi bergantung pada spesifikasi rotor itu sendiri.

Pada generator arus searah (DC) terdapat *rectifier* yang berfungsi untuk mengubah arus AC menjadi DC. Generator ini menghasilkan tegangan yang arahnya tetap dan bila dihubungkan dengan beban, akan menimbulkan arus searah pula. Pada umumnya generator arus searah dapat menghasilkan listrik pada putaran yang tinggi. Untuk digunakan pada turbin angin, jenis generator ini memerlukan transmisi untuk menaikkan putaran.

Pada penelitian turbin angin ini, generator yang digunakan adalah generator AC dengan menggunakan magnet permanen. Generator jenis ini disebut juga *Permanent Magnet Generator* (PMG) yang dapat menghasilkan daya dan tegangan listrik pada putaran yang rendah.



Gambar 2.11 Bagian-bagian generator.

Komponen-komponen dinamo pada Gambar 2.1 adalah sebagai berikut.

1. *Pulley*: penggerak untuk menjalankan suatu hantaran (daya).
2. *Fan*: kipas pendingin untuk menghasilkan sirkulasi udara.
3. *Spacer / washer*: peralatan pengkondisi udara.
4. *Front frame*: rumah bantalan bagian depan.
5. Rotor: gabungan kutub magnet (bagian dari dinamo yang bergerak).
6. *Bearing*: bantalan yang berfungsi untuk memperhalus putaran rotor sehingga rotor lebih tahan lama digunakan
7. Stator: gulungan kawat yang sifatnya diam/stabil.
8. *Brush*: sikat arang.
9. *Brush holder*: rumah sikat.
10. *Rectifier*: rangkaian dioda yang mengkonversi tegangan AC menjadi tegangan DC.
11. *Rear frame*: rumah bantalan bagian belakang, terdapat saluran udara untuk meningkatkan efesiensi pendinginan.